

ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА ER-YAG ЛАЗЕРА

Д. В. Филиппов, С. А. Буйко

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

В 1974 году сотрудниками Института общей физики было предложено использовать для создания трехмикронного лазера высококонцентрированные кристаллы Er^{3+} -YAG (>30 %), на которых была получена генерация при комнатной температуре на $\lambda = 2,94$ мкм. Был создан первый в мире эффективный лазер трехмикронного диапазона спектра [1].

У большого количества кристаллов, активированных ионами Nd^{3+} и Cr^{3+} , наблюдается температурное смещение линии стимулированного излучения. В частности, для кристалла Nd-YAG при увеличении температуры с 77 до 600 К длина волны генерации увеличивается с 1,0610 до 1,0627 мкм (или 0,03 Å/К) [2]. Плавное смещение частоты линии генерации связано со смещением штарковских уровней активированного иона вследствие влияния решетки. В подавляющем большинстве случаев, известных из эксперимента, это смещение обуславливает сдвиг линии генерации в длинноволновую сторону. Информации о температурной зависимости линии генерации в кристалле Er^{3+} -YAG найти не удалось.

Целью данной работы являлась разработка методики измерения длины волны лазерного излучения в окрестности $\lambda = 3$ мкм и исследование спектра излучения импульсно-периодического $\text{Er}(50\%)$ -YAG лазера с напыленными на торец активного элемента диэлектрическими зеркалами, образующими резонатор.

Метод измерения через наложение разных порядков дифракции

Особенность использованного в работе метода измерения состоит в том, что в нем не предполагается наличие у исследователя реперного источника излучения в окрестности $\lambda = 3$ мкм. Взамен него используется реперный источник видимого участка спектра. Данный метод базируется на существовании в отраженном от дифракционной решетки излучении спектров различных порядков, в частности монохроматического излучения, отраженного от решетки под близкими углами. Основная формула дифракционной решетки [3]

$$m(\sin\varphi - \sin\psi) = k\lambda. \quad (1)$$

Она показывает, что одни и те же углы дифракции будут наблюдаться для совокупности длин волн λ_i , удовлетворяющих соотношению

$$m(\sin\varphi - \sin\psi) = k_i\lambda_i, \quad (2)$$

где k_i – соответствующая λ_i последовательность натуральных чисел, возможных для данной решетки.

Это свойство дифракционной решетки позволяет измерять длину волны $\sim 2,94$ мкм по относительному расположению ее линии первого порядка ($k = 1$) среди линий ~ 590 нм пятого порядка дифракции ($k = 5$). Данный метод проведения измерений является апробированным и широко известным в спектроскопии [3].

Метод обработки экспериментальных данных

Калибровка спектрометра проводилась с помощью таблицы, где каждой из трех идентифицированных линий неоновой лампы ЛТ-6М ставилась в соответствие координата (в делениях микрометрического лимба подвижки), на которой была установлена выходная щель спектрометра. Линии с наименьшей длиной волны присваивалась координата «1» (см. табл. 1), остальным линиям координата присваивалась в соответствии с их смещением относительно первой линии.

Таблица 1

Соответствие длин волн координате спектрометра

Длина волны λ_i , Å	Координата C_i , дел
5852,49	1
5881,89	1+1447
5944,83	1+1447+3107

Далее на основе составленной таблицы строилась новая таблица, где в первом столбце стояли всевозможные разности длин волн $\Delta\lambda_{ij}$, обозначаемые далее L_i , между реперными линиями. Во втором столбце – соответствующие разности координат ΔC_{ij} , обозначаемые далее X_i (см. табл. 2).

Таблица 2

Соответствие разности длин волн разности координат спектрометра

Разность длин волн L_i , Å	Разность координат X_i , дел
29,4	1447
92,34	4554
62,94	3107

Полученный массив из $K = C_N^2 = 3$ точек, где

$N = 3$ – число реперных линий, аппроксимировался проходящей через начало координат прямой $X = aL$ по методу наименьших квадратов [4]

$$a = \frac{\sum_{i=1}^K L_i X_i}{\sum_{i=1}^K L_i L_i} \quad (3)$$

Наклон данной прямой определяет линейную дисперсию D спектрометра в единицах измерения $\text{Å}/\text{дел.}$

$$D = 1/a. \quad (4)$$

Полученный калибровочный график представлен на рис. 1

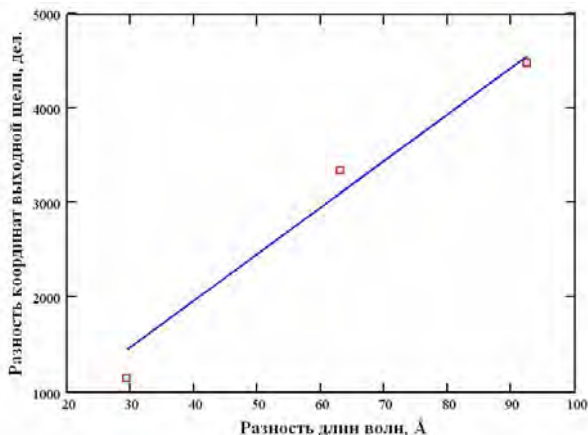


Рис. 1. Калибровочный график спектрометра. Для наглядности отклонение точек от прямой, проведенной по методу наименьших квадратов, увеличено в 100 раз вдоль ординаты

Неизвестная длина волны λ определялась следующим образом. Измерялось расстояние (в делениях

лимба) $\Delta X_{\text{ближ}}$ от измеряемой длины волны до ближайшей реперной, далее по формуле определяем

$$\lambda = \lambda_{\text{rep}} + \Delta X_{\text{ближ}}/a. \quad (5)$$

Калибровка спектрометра осуществляется по спектральным линиям неона, даваемым неоновой лампой ЛТ-6М с полым катодом. Как известно [5], давление в лампах с полым катодом не превышает нескольких мм рт. ст. При таких давлениях ширина линий излучения газа лампы определяется доплеровским эффектом. Величина доплеровского уширения составляет при этом величину от 0,02 до 0,03 Å .

При калибровке свет от неоновой лампы проходил через входную щель $s1$, которая находилась в фокусе сферического зеркала $F = 294$ см.

Отраженный от зеркала плоский пучок света падал на отражательную дифракционную решетку под углом $\psi = \beta - 2\alpha = 28^\circ - 4^\circ = 24^\circ$ таким образом, что вся площадь решетки была освещена. Угол поворота дифракционной решетки был подобран так, чтобы линии 5-го порядка дифракции с $\lambda \sim 590$ нм шли от решетки по тому пути, по которому к решетке шел отраженный от сферического зеркала свет неоновой лампы. В таком случае изображение спектра излучения сфокусируется в плоскости входной щели $s1$. Для удобства размещения на оптическом столе элементов схемы было использовано плоское поворотное зеркало, которое позволило отвести изображение спектра в сторону от входной щели. В плоскости фокусировки спектра была размещена выходная щель $s2 = 0,13$ мм, которая была установлена на механической подвижке с микрометрическим лимбом. Подвижка обеспечивала смещение на ~ 45 мм в плоскости фокусировки спектра, позволяя тем самым сканировать спектр. Одно деление лимба соответствовало смещению на 10 мкм.

Схема экспериментальной установки

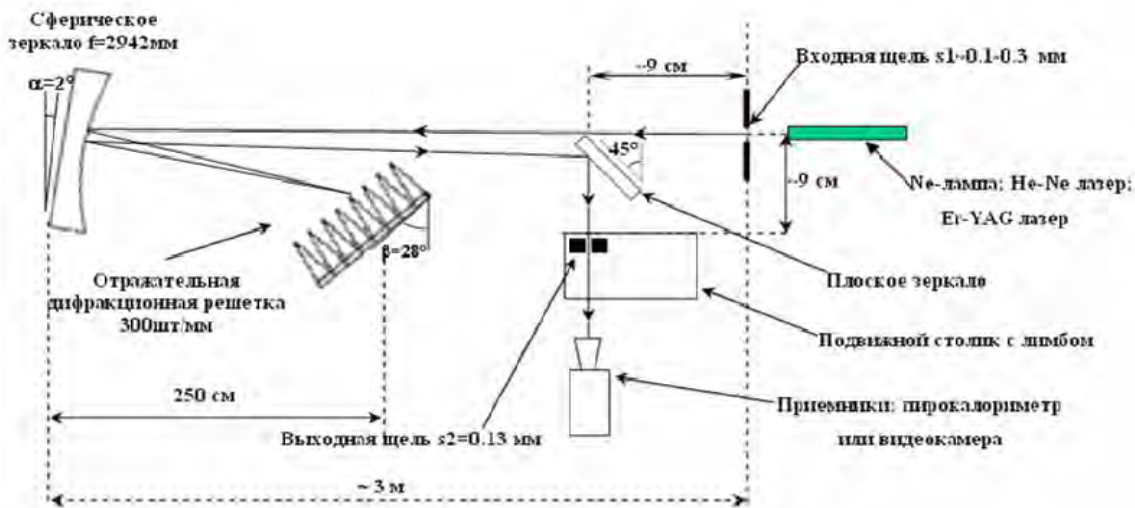


Рис. 2. Схема спектрометра

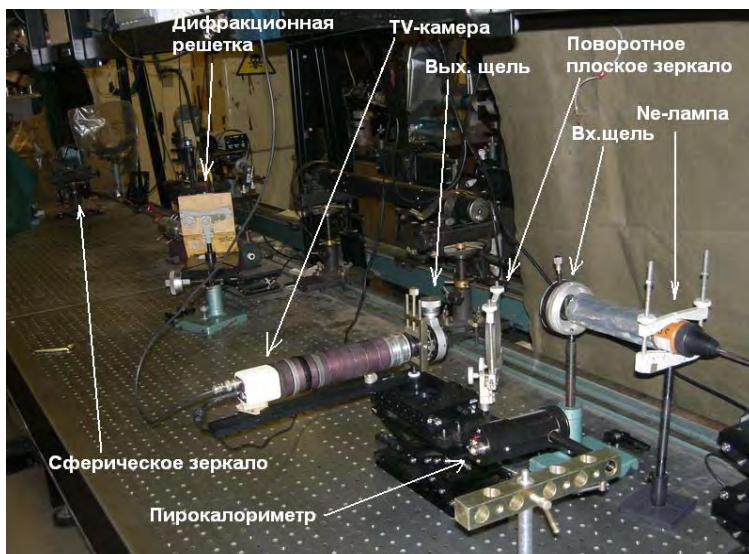


Рис. 3. Фотография спектрометра

Изображение выходной щели выводилось на телевизионный экран с помощью телевизионной камеры.

После проведения калибровки спектрометра неоновая камера убиралась с пути следования излучения эрбиевого лазера, а телевизионная камера заменялась на пирокалориметр Moletron J4-09, подключенный к осциллографу Tektronix TDS420A.

Выходная щель располагалась вдоль оси, перпендикулярной плоскости рисунка, ниже, чем входная щель, на 5 см.

Характеристики исследуемого лазера:

- Кристалл – $(Er_x Y_{1-x})_3 Al_5 O_{12}$, где $x = 0,5$.
- Стержень имеет плоскопараллельные торцы с напыленными на торец диэлектрическими зеркалами, образующими интерферометр Фабри – Перо. Диаметр стержня 4 мм, длина 100 мм.
- Расходимость пучка от 6 до 16 мрад в зависимости от температуры стержня.
- Максимальная средняя мощность – 10 Вт (10 Гц при 1 Дж в импульсе).
- Длительность импульса – 200 мкс.

Паспортные характеристики дифракционной решетки:

- Реплика плоская.
- Реплика покрыта слоем алюминия.
- Число штрихов на 1 мм 300.
- Размер заштрихованной области 96×60 мм.
- Общее число штрихов 28800.

В установке автоколлимационного типа реплика дает преимущественную концентрацию света в области от 0,2 до 0,65 мкм в 1-м левом порядке. (Правые и левые порядки условно определены для случая, когда реплика обращена рабочей поверхностью к наблюдателю.) При $\lambda = 5086 \text{ \AA}$ реплика концентрирует 62 % отраженного света в 6-м порядке. Разрешающая способность 0,85 от теоретического значения.

Характеристики спектрометра

Рассчитаем дисперсию и разрешающую способность схемы.

Из основной формулы дифракционной решетки (1) следует, что линейная дисперсия спектрометра (см. рис. 3) составляет

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{\cos \varphi}{NkF}, \quad (6)$$

где φ – угол отражения от решетки, N – число штрихов на мм, k – порядок дифракции, F – фокусное расстояние сферического зеркала.

В случае рассматриваемого спектрометра: $\varphi \approx \psi = 2\alpha - \beta = 28^\circ - 4^\circ = 24^\circ$; $F = 294,2$ см;

$$\left. \frac{d\lambda}{dx} \right|_{\text{расч}} = 2 \frac{\text{А}}{\text{мм}}.$$

Экспериментально измеренное значение линейной дисперсии составило $2,070 \frac{\text{А}}{\text{мм}}$.

Минимальная разница длин волн, соответствующая разрешающей способности, по известному [6] критерию Рэля определяется как

$$\Delta\lambda = \lambda/(mN). \quad (7)$$

Также необходимо учесть, что согласно паспорту у используемой решетки разрешающая способность составляла 0,85 от теоретического значения. В таком случае получаем:

$\Delta\lambda = 5900\text{ \AA}/(0,85 \cdot 28800) = 0,05 \text{ \AA}$ для реперных линий (~0,6 мкм);

$\Delta\lambda = 29400\text{ \AA}/(0,85 \cdot 28800) = 1,20 \text{ \AA}$ для измеряемой длины волны (~3 мкм).

Нормальная ширина входной щели определяется [7] по формуле

$$s_{vis} = F \frac{\lambda}{D}, \quad (8)$$

где F – фокусное расстояние 294 см; λ – длина волны излучения; D – ширина пучка, падающего на дифракционную решетку,

$$D = L \cos(\psi) = 96 \text{ мм} \cdot \cos(24^\circ) \sim 85 \text{ мм},$$

где L – сторона решетки.

Расчет по (8) дает значение $s_{vis} = 20$ мкм для видимого излучения и $s_{infra} = 100$ мкм для инфракрасного излучения.

Ширина входной щели спектрометра выбиралась из следующих соображений:

- Обеспечить близкую к предельной точности измерения положения калибровочных линий.
- Обеспечить максимально возможную величину сигнала на пирокалориметре.

Для входной и выходной щелей была выбрана величина $s = 130$ мкм как компромисс между этими соображениями.

В этом случае расчетная величина спектральной ширины выходной щели, вычисляемая как произведение линейной дисперсии на ширину выходной щели для инфракрасного излучения, составляет $\Delta\lambda_{infra}^{exp} \sim 1,3 \text{ \AA}$, а для видимого излучения $\Delta\lambda_{vis}^{exp} \sim 0,25 \text{ \AA}$.

Контрольное измерение длины волны линии 6328,17 Å в спектре неона

Тестирование спектрометра было проведено на измерении известной [8] длины волны линии спектра неона $\lambda_{rest} = 6328,17 \text{ \AA}$.

Экспериментальные данные представлены в табл. 3.

Таблица 3

Экспериментальные данные по измерению линии спектра неона $\lambda_{rest} = 6328,17 \text{ \AA}$.

Диапазон длин волн, Å	Число делений лимба, 1 дел = 10 мкм	Смещение выходной щели, мм
От 6304,79 до 6313,69	585	5,85
От 6313,69 до 6328,17	930	9,30
От 6328,17 до 6330,90	175	1,75
От 6330,90 до 6334,43	219	2,19

В эксперименте все линии, кроме 6328,17 Å, считались реперными.

Расчет, выполненный по изложенной методике обработки экспериментальных данных и формуле (5), дает результат $\lambda_{rest} = 6328,18 \pm 0,06 \text{ \AA}$, что совпадает в пределах погрешности с табличным значением.

Точность измерения $0,06 \text{ \AA}$ определялась точностью выставления реперных линий и измеряемой линии в выходной щели спектрометра. В случае линий неоновой лампы точность выставления составляла два деления лимба.

Изучение спектра эрбиевого лазера

Работа по изучению спектра лазера заключалась в исследовании зависимости спектра от интенсивности эксплуатации лазера. Для определения этой зависимости было проведено два эксперимента. В первом была измерена зависимость $\lambda(\nu)$, где ν – частота срабатывания лазера, $\nu = 0,1 - 9$ Гц; во втором – зависимость $\lambda(U_{пит})$, где $U_{пит}$ – напряжение питания лампы накачки, $U_{пит} = 700 - 1000$ В. Дополнительно в каждом эксперименте предварительно прокалиброванной термопарой измерялась температура корпуса квантрона. В обеих сериях экспериментов измерения производились спустя 30 минут после изменения параметров работы лазера.



Рис. 4. Фотография квантрона лазера

Таблица 4

Показания пирокалориметра за выходной щелью в зависимости от смещения выходной щели относительно реперной линии 5881,89 Å.

Делений до линии 5881,89 Å	Показания пирокалориметра, мВ						
	0,1 Гц	1 Гц	2 Гц	4 Гц	5 Гц	6 Гц	7 Гц
389	15	24	12	---	---	---	---
394	50	57	---	---	---	---	---
399	93	110	68	0	0	---	---
404	157	150	114	0	0	---	---
409	198	189	153	20	3	---	---
414	218	188	172	46	6	---	---
419	204	159	161	79	15	---	---
424	175	99	129	120	40	11	5
429	108	56	83	141	79	33	9
434	63	27	46	141	115	85	28
439	---	10	18	---	133	138	50
444	---	6	---	72	128	145	94
449	---	---	---	46	92	136	117
454	---	---	---	22	69	114	137
459	---	---	---	---	33	74	125
464	---	---	---	---	16	40	96
469	---	---	---	---	---	25	68
474	---	---	---	---	---	6	40
479	---	---	---	---	---	---	20

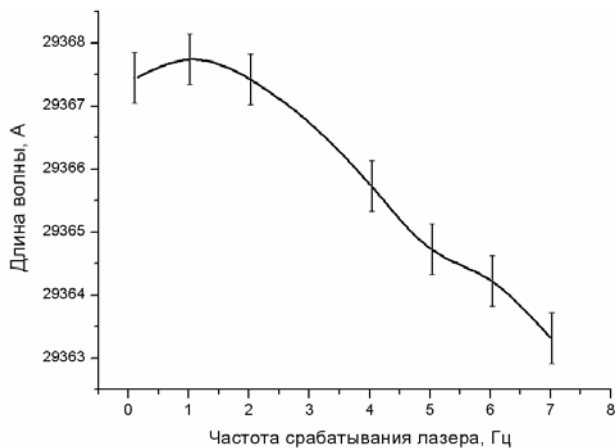


Рис. 5. График зависимости длины волны от частоты срабатывания лазера. Точки – эксперимент, линия – аппроксимация. При увеличении частоты импульсов спектр излучения смещался в коротковолновую область. Погрешность отдельного измерения определялась точностью наведения на центр профиля сигнала со спектральной шириной ~ 3 Å и составляла $0,4$ Å

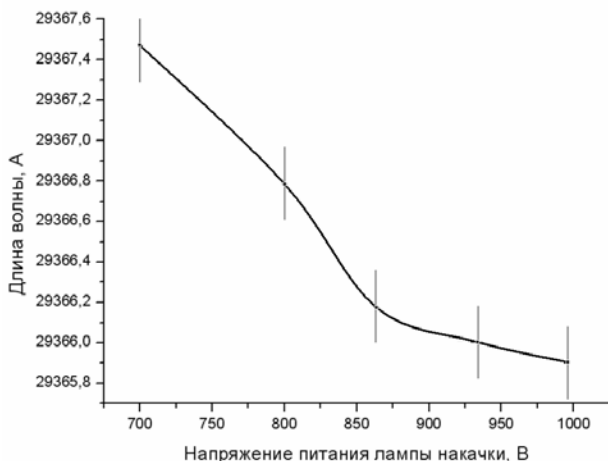


Рис. 6. График зависимости длины волны от напряжения лампы накачки при частоте выстрелов 2 Гц. Погрешность отдельного измерения определялась точностью наведения на центр профиля сигнала со спектральной шириной ~ 3 Å и составляла $0,4$ Å

Таблица 5

Показания пирокалориметра за выходной щелью в зависимости от смещения выходной щели относительно реперной линии $5881,89$ Å

Делений до линии $5881,89$ Å	Показания пирокалориметра, мВ				
	700 В	800 В	863 В	934 В	996 В
390	---	6	14	---	---
395	20	15	37	---	---
400	39	44	81	21	20
405	59	86	116	53	47
410	73	146	172	134	126
415	82	189	200	209	244
420	74	210	270	322	370
425	58	203	299	390	488
430	37	162	297	424	532
435	13	118	240	374	496
440	---	65	190	272	388
445	---	26	106	157	244
450	---	---	39	84	140
455	---	---	20	44	68
460	---	---	---	12	26

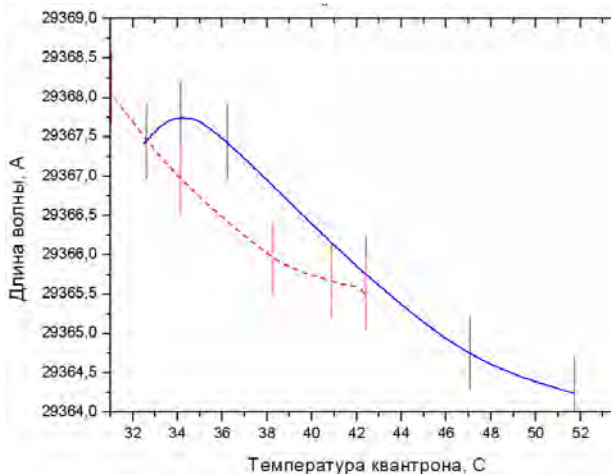


Рис. 7. Зависимость длины волны лазера от температуры в различных режимах работы. При нагреве квантрона спектр излучения смещался в коротковолновую область. Сплошная кривая соответствует нагреву за счет увеличения частоты срабатывания; пунктирная кривая соответствует нагреву за счет увеличения напряжения на лампе накачки при $\nu_{\text{срб}} = 2$ Гц

Оценка ширины спектра

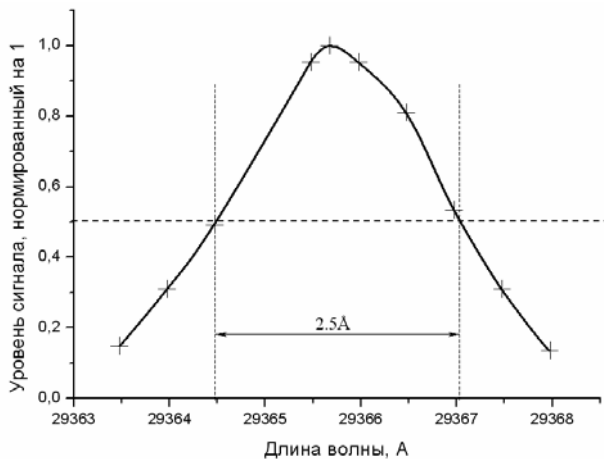


Рис. 8. Типичный профиль сигнала, построенный по табл. 6. Точки – экспериментальные данные. Ширина спектра на полувысоте составляет 2,5 Å. Нормальная ширина щели спектрометра в инфракрасном свете 100 мкм; использованная ширина выходной щели спектрометра 130 мкм; расчетная спектральная ширина использованной выходной щели 1,3 Å

Выводы

Изучен спектр излучения импульсно-периодического Er(50 %)-YAG лазера с напыленными на торец активного элемента диэлектрическими зеркалами, образующими резонатор.

Обнаружено смещение спектра излучения в коротковолновую область с $\lambda = 29367 \pm 0,4 \text{ Å}$ до $\lambda =$

$= 29363 \pm 0,4 \text{ Å}$ при увеличении температуры квантрона с 34 до 54 °С.

Экспериментально определен порядок температурного смещения спектра генерации лазера $0,2 \text{ Å/°C}$.

Важным результатом проведенных исследований стала оценка на ширину (по уровню половины сигнала) контура лазерного излучения. Ее величина в проведенных экспериментах не превышала 2,5 Å.

Литература

1. Лазер на кристаллах иттрий-эрбий-алюминиевого граната // Сб. трудов Института общей физики. М.: Наука, 1989.
2. Каминский А. А. Лазерные кристаллы. М.: Наука, 1975.
3. Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. Н. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1972.
4. Сквайрс Дж. Практическая физика. М.: Мир, 1971.
5. Лебедев В. В. Экспериментальная оптика. М.: Изд-во Московского университета, 1994.
6. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Оптика. М.: 1980.
7. Малышев В. И. Введение в экспериментальную спектроскопию. М.: Наука, 1979.
8. Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М. и др. Таблицы спектральных линий: Справочник. М.: Наука, 1977.